

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

Кафедра інформаційних технологій факультету №4

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни Фізика обов'язкової компоненти
освітньої програми першого рівня вищої освіти

125 Кібербезпека (безпека інформаційних та комунікаційних систем)

за темою – (Квантова оптика, дуалізм світла)

Харків 2018

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від _____ № _____

СХВАЛЕНО

Вченою радою факультету № 4
Протокол від _____ № _____

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від _____ № _____

Розглянуто на засіданні кафедри інформаційних технологій
протокол від _____ № _____

Розробники:

1. доцент кафедри, кандидат технічних наук Світличний В.А.

Рецензенти:

1. доцент кафедри кібербезпеки факультету №4 ХНУВС, к.т.н., доцент Носов В.В.,
2. професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів ХНУРЕ, к.т.н., доцент Хорошайло Ю.С.

План лекції:

1. Вступ. Явище фотоефекту. Досліди Столетова. Закономірності фотоефекту. Пояснення закономірностей фотоефекту з точки зору хвильової та квантової теорії світла. Рівняння Ейнштейна для фотоефекту.
2. Висновки.

Основна література:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том. 4. Оптика – М.: Высшая школа, 1979, 768 с.
2. Бланк А.Я. Физика. – Харьков, "Каравелла", 1996.
3. Лопатинський Є.І., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2005. 394 с.

Додаткова література:

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики \в 3-х томах\ - Киев, "Дніпро", 1994.
2. Айзензон А.Е. Курс физики – Москва, "Высшая школа", 1996.
3. Орір Дж. Физика в 2-х томах. – М: Мир, 1981.
4. Детлаф А.А., Яворський В.М. Курс общей физики \в 3-х томах\ – М.: Высшая школа, 1983.

Текст лекції.

1. Вступ. Взаємодія електромагнітної хвилі і речовини полягає в тому, що електромагнітна хвиля передає речовині енергію. У загальному випадку ця енергія переходить у тепло і температура речовини збільшується. Але, інколи, тільки частина енергії хвилі йде на нагрівання речовини, друга частина енергії зазнає перетворень в інші види енергії. Так, під час поглинання світла деякими речовинами частина світлової енергії перетворюється на електричну енергію, тобто в речовині виникає електрорушійна сила. Це явище називають фотоефектом. Отже, явище **фотоефекту** (фотоелектричного ефекту) – це виникнення в речовині електрорушійної сили під дією освітлення. Фотоефект поділяють на зовнішній і внутрішній. *Зовнішній* – це виривання електронів з поверхні металів під дією освітлення. *Внутрішній* – це перехід електронів із зв'язаного стану у вільний під дією освітлення.

Явище зовнішнього фотоефекту було відкрито Генріхом Герцем у 1887 році. Він помітив, що заряджена негативними зарядами цинкова пластина швидко втрачає свій заряд під дією ультрафіолетового проміння. Це показувало на те, що під дією ультрафіолетового проміння з цинкової пластини виривались електрони.

Перші фундаментальні дослідження фотоефекту були виконані російським фізиком Олександром Столетовим у 1888-1890 роках. Експериментальна установка Столетова складалась із цинкової пластини (Zn), на яку крізь сітку (C) падало ультрафіолетове проміння від джерела S (рис. 1). Вільні електрони цинкової пластини під дією електромагнітних хвиль виривались з поверхні пластини й деяка їх кількість досягала сітки. Цинкова пластина і сітка з'єднувались між собою через гальванометр (G), який показував наявність струму в замкненому колі. Такий струм було названо *фотострумом*.

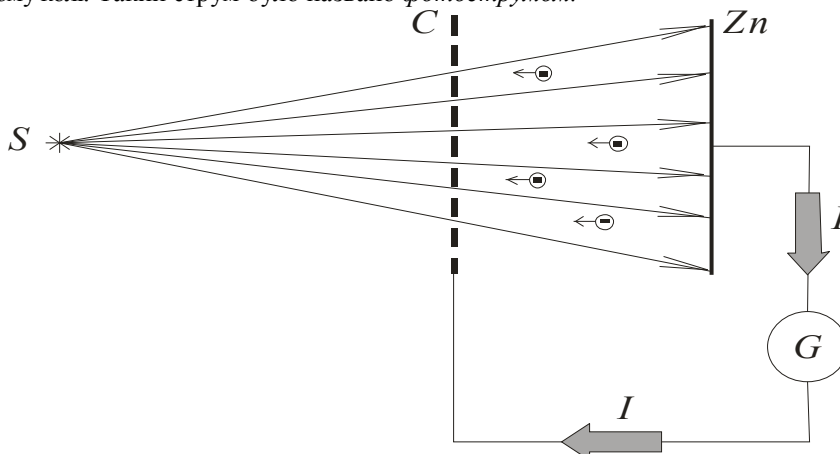


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Сила фотоструму зростала, якщо між сіткою й пластиною створити електричне поле за допомогою джерела постійного струму (рис. 2). При цьому електричне поле не тільки напрямляло вивільнені електрони від пластини до сітки, але й прискорювало їх. Експеримент показував, що залежність сили фотоструму від напруги між сіткою й пластиною не підпорядковується закону Ома.

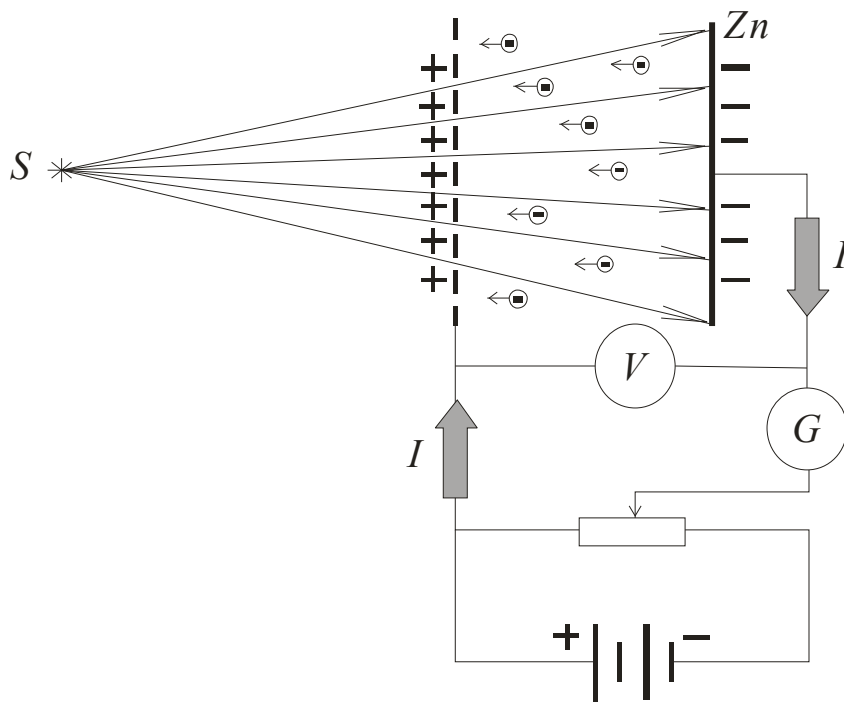


Рис. 2. Схема експериментальної установки

Для даної інтенсивності електромагнітних хвиль із збільшенням напруги сила фотоструму зростала лише до певного значення I_H . Такий фотострум було назване *фотострумом насичення* (рис. 3). Він свідчив про те, що всі вивільнені електрони досягають сітки.

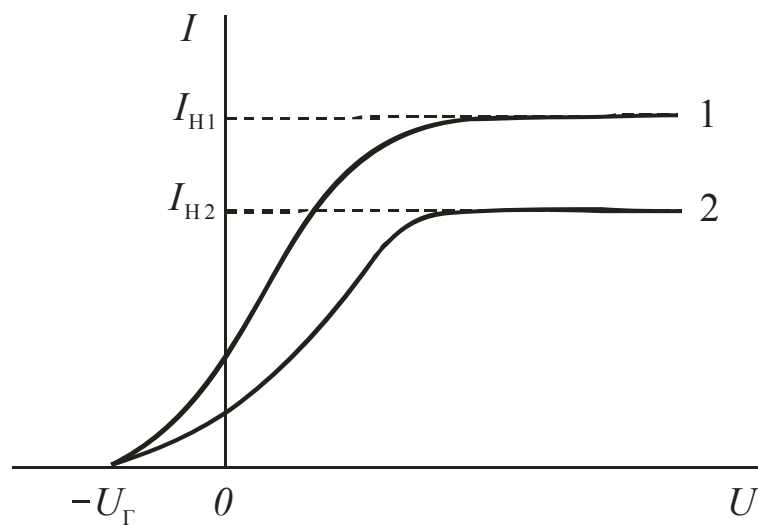


Рис. 3. Залежність фотоструму від напруги між пластиною і сіткою
(1– ультрафіолетове проміння більшої інтенсивності;
2– ультрафіолетове проміння меншої інтенсивності)

Із графіка залежності сили фотоструму від напруги можна побачити, що зменшувати силу фотоструму до нульового значення можна при умові, якщо між цинковою пластиною і сіткою прикласти зворотну напругу, тобто цинкову пластину з'єднати із плюсом джерела, а сітку – із мінусом джерела. При цьому електричне цьому поле вже не прискорює вивільнені електрони, а гальмує їх.

Для деякого значення зворотної напруги, яку називають *гальмівною напругою* U_G , фотострум в колі припиняється (рис. 4). Це означає, що для $U = -U_G$ гальмуються найбільш швидкі електрони зі швидкістю V_{max} . За законом збереження й перетворення енергії робота сил електричного поля, яке протидіє рухові найбільш швидких електронів, дорівнює кінетичній енергії цих електронів:

$$eU_r = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (1)$$

де m і e – маса і заряд електрона. Отже, якщо виміряти гальмівну напругу, то можна знайти максимальне значення швидкості вивільнених електронів:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_r}{m}}. \quad (2)$$

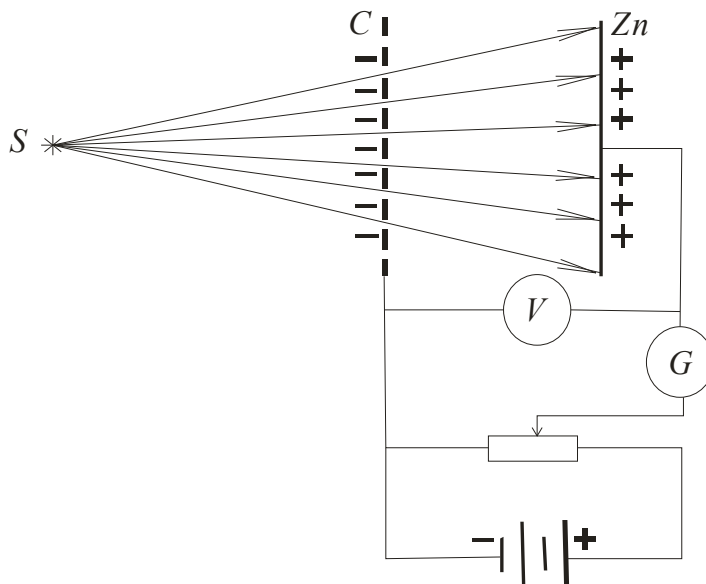


Рис. 4. Схема експериментальної установки ($U = -U_r$, $I = 0$)

Дослідження Столетова та інших вчених привели до встановлення таких *закономірностей фотоелектричного ефекту*:

1. Фотоелектричний ефект починається тільки при цілком певній для даного металу мінімальній частоті електромагнітних хвиль, яку називають „червоною межею” фотоелектричного ефекту.
2. Сила фотоструму насичення прямо пропорційна інтенсивності електромагнітних хвиль, що падають на металеву пластину.
3. Максимальна швидкість вивільнених електронів прямо пропорційна частоті електромагнітних хвиль й не залежить від їх інтенсивності.
4. Явище фотоелектричного ефекту є без інерційним, тобто фотоелектричний ефект починається одночасно з освітленням поверхні металу з точністю до однієї мільярдної долі секунди.

Закономірності фотоелектричного ефекту не узгоджуються з передбаченнями *хвильової теорії* про природу світла. Так, електрон, завдяки дуже малим розмірам, повинен сприймати незначну енергію електромагнітних хвиль і накопичувати її тривалий час доти, поки вона стане достатньою для подолання зв'язків електрона з ядром атома. Розрахунки показують, що навіть при значній інтенсивності електромагнітних хвиль вихід електрона відбувся б лише через кілька діб. Але експеримент показує, що фотоелектричний ефект є без інерційним явищем.

З погляду *хвильової теорії* світла максимальна швидкість вивільнених електронів повинна залежати від інтенсивності електромагнітних хвиль, тому що коли на речовину падає електромагнітна хвиля, то вона змушує електрони коливатися з амплітудою, яка пропорційна амплітуді хвилі. Оскільки інтенсивність електромагнітних хвиль пропорційна квадрату амплітуди хвилі $I \sim E^2$, то енергія вимушених коливань електронів, вихід їх за поверхню металу, а отже й їхня максимальна швидкість повинні залежати б від інтенсивності електромагнітних хвиль. Насправді такої залежності нема.

Явище фотоелектричного ефекту та його закономірності повністю пояснюються *квантовою теорією* світла. Згідно гіпотези німецького фізика Макса Планка електромагнітні хвилі випромінюються окремими порціями, які було названо *квантами*. При цьому енергія кванта пропорційна частоті електромагнітних хвиль:

$$E = h\nu,$$

де ν – частота світла, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с – стала Планка.

Розвиваючи гіпотезу Планка, Альберт Ейнштейн дав перше теоретичне пояснення закономірностям фотоелектричного ефекту. Він висунув думку про те, що електромагнітні хвилі не тільки випромінюються, але й

поширюються в просторі і поглинаються речовиною також окремими порціями, тобто квантами. При цьому під час випромінювання, поширення і поглинання кванти поводять себе як особливі елементарні частинки. Такі елементарні частинки отримали спеціальну назву – **фотони**. Отже, з точки зору квантової теорії, світло – це потік матеріальних частинок, тобто фотонів.

Розглянемо властивості фотонів. Енергія фотона прямо пропорційна частоті світла $E = h\nu$.

Виходячи із закону взаємозв'язку маси і енергії $E = mc^2$, можна визначити масу фотона $h\nu = m_\phi c^2$.

Звідки $m_\phi = \frac{h\nu}{c^2}$. За теорією відносності частинка, яка рухається зі швидкістю v , що близька до швидкості світла у вакуумі (повітрі), має масу:

$$m_\phi = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Знайдемо масу спокою фотона m_0 . Вона дорівнює:

$$m_0 = m_\phi \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{h\nu}{c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,$$

оскільки фотон рухається у вакуумі зі швидкістю світла $V = c$. Звідки випливає, що маса спокою фотона дорівнює нулю.

Отже фотон – це особлива частинка, яка істотно відрізняється від таких частинок, як електрон, протон, нейтрон, що мають відмінну від нуля масу спокою. Фотон не має маси спокою і може існувати тільки в русі зі швидкістю світла c . Фотон не має електричного заряду. Його час життя безмежний. Це свідчить про те, що фотон є стійкою частинкою, для якої самовільного розпаду не відбувається.

Імпульс фотона дорівнює:

$$P_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{Tc} = \frac{h\omega}{2\pi c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{\hbar 2\pi}{cT} = \frac{\hbar 2\pi}{\lambda} = \hbar k,$$

де $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – стала Планка, k – хвильове число або модуль хвильового вектора. У векторній формі співвідношення набуває вигляду:

$$\vec{P}_\phi = \hbar \vec{k},$$

де \vec{k} – хвильовий вектор. Напрямок вектора імпульсу фотона і хвильового вектора співпадають, тому що фотон рухається в напрямі поширення електромагнітної хвилі.

Ейнштейн у 1905 році пояснив закономірності фотоефекту на основі припущення про те, що енергія фотона поглинається тільки одним із вільних електронів металевої пластини, яка освітлюється. При цьому цієї енергії повинно вистачити на виривання електрона з поверхні пластини, тобто на виконання роботи виходу, й на надання електрону кінетичної енергії. Застосовуючи закон збереження енергії до взаємодії фотона з електроном, Ейнштейн одержав **рівняння фотоефекту**, яке носить його ім'я:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (3)$$

де A – робота виходу електрона з металу, $\frac{mv_{\max}^2}{2}$ – максимальне значення кінетичної енергії електрона.

Робота виходу – це найменша енергія, яку необхідно надати електрону, щоб вивільнити його з поверхні металу у вакуум. Енергія переважної більшості падаючих на метал фотонів перетворюється на тепло і тільки близько 1% фотонів спричиняють вивільнення електронів. Глибина активного в фотоелектричному відношенні шару на поверхні металу не перевищує сотні атомних діаметрів, тобто $d \sim 10^{-8} \text{ м}$.

Пояснимо закономірності фотоефекту з точки зору *квантової теорії* світла. Без інерційності фотоефекту підтверджується тим, що електрони сприймають енергію електромагнітних хвиль окремими порціями, завдяки чому виходять за межі поверхні металу. В іншому випадку енергія фотона недостатня для вивільнення електрона.

Розглянемо вольт-амперну характеристику фотоелектру (рис. 3). Пологий хід кривої залежності сили фотоструму від напруги, яка прикладена між сіткою і цинковою пластиною, свідчить про те, що вивільнені з пластини електрони рухаються з різними швидкостями. Це залежить від того, де електрон поглинає фотон: або на поверхні металу, або на деякій глибині. Якщо до електродів прикладена від'ємна гальмуюча напруга U_{Γ} , то фотострум відсутній. Це означає, що найбільш швидкі електрони не можуть досягти сітки. За допомогою рівняння Ейнштейна знайдемо гальмівну напругу. Для цього, використовуючи рівняння (1), рівняння (2) подамо у вигляді: $h\nu = A + eU_{\Gamma}$, $eU_{\Gamma} = h\nu - A$. Звідки:

$$U_{\Gamma} = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}. \quad (4)$$

Графік рівняння (4) поданий на рис. 5. Він показує, що фотоелектр для даного матеріалу пластини починається при певній частоті ν_{\min} електромагнітних хвиль, яку називають „червоною межею” фотоелектру. Якщо $\nu = \nu_{\min}$, то $U_{\Gamma} = 0$. Тоді рівняння (4) набуває вигляду:

$$0 = \frac{h}{e}\nu_{\min} - \frac{A}{e} \quad \text{або} \quad \frac{h}{e}\nu_{\min} = \frac{A}{e}, \quad h\nu_{\min} = A. \quad \text{Звідки} \quad \nu_{\min} = \frac{A}{h}.$$

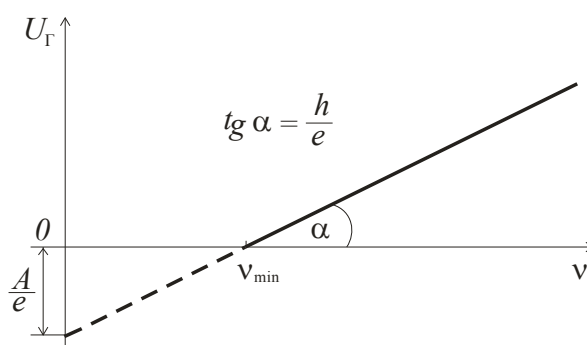


Рис. 5. Залежність гальмівної напруги від частоти електромагнітної хвилі

З рівняння Ейнштейна випливає, що фотоелектр можливий лише тоді, коли $h\nu \geq A$, де $\nu = \nu_{\min}$.

Інтенсивність електромагнітних хвиль прямо пропорційна кількості фотонів. Тоді збільшення інтенсивності електромагнітних хвиль зумовлює збільшення кількості вивільнених електронів, тобто збільшення фотоструму насичення. Тому сила фотоструму насичення прямо пропорційна інтенсивності електромагнітних хвиль.

З рівняння Ейнштейна бачимо, що максимальна швидкість вивільнених електронів буде тим більшою, чим більша частота електромагнітних хвиль:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m}}.$$

Вона не залежить від інтенсивності електромагнітних хвиль, тому що ні величина A , ні величина h від інтенсивності електромагнітних хвиль не залежать. Отже, квантова теорія світла дає змогу пояснити всі закономірності фотоелектру.

2. Висновок. В даній лекції розглянуті питання дуалізму світла та квантової оптики. Засвоєння цих фізичних явищ і законів, методів фізичного дослідження, є базою при подальшому вивченні спеціалізованих дисциплін. Формування правильного розуміння границь застосовності фізичних понять, законів, теорій дозволить оцінювати ступінь вірогідності результатів, отриманих за допомогою експериментальних методів дослідження. Навчання побудові математичних моделей фізичних явищ, а також їхнього аналізу на основі аналітичних рішень і чисельного експерименту дозволить курсантам набути стійких навичок роботи за фахом.